VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

8. Proiectarea antiseismică a podurilor

8.1. Principii de proiectare

Podurile sunt structuri inginereşti destinate traversării unor obstacole de către o cale de comunicaţie terestră. Din punct de vedere structural, un pod se compune din suprastructură şi infrastructură (vezi Figura 8.1). Suprastructura (tablierul) este partea superioară a podului care preia încărcările din trafic. Infrastructura serveşte la transmiterea eforturilor de la suprastructură către teren şi este alcătuită din pile (reazeme intermediare) şi culee (reazeme de capăt). Legătura dintre infrastructură şi suprastructură poate fi de tip încastrat, articulat, sau simplu rezemat. Deseori sunt necesare reazeme simplu rezemate şi rosturi de dilataţie pentru a limita eforturile provenite din variaţii de temperatură.

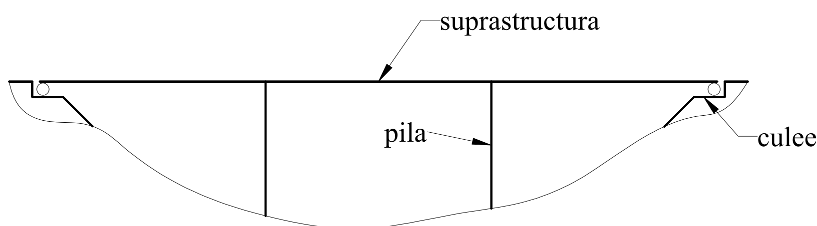


Figura 8.1. Elementele principale ale structurii unui pod.

Importanţa prevenirii colapsului podurilor în urma unor cutremure de pământ are la bază câteva motive. Primul dintre acestea este acelaşi cu cerinţa impusă clădirilor în general: prevenirea pierderilor de vieţi omeneşti. Cel de-al doilea constă în faptul că în foarte multe cazuri podurile reprezintă legături vitale în reţeaua de transport. În lipsa unor căi de comunicaţie alternative, distrugerea unui pod poate întrerupe traficul, făcând imposibile activităţile echipelor de intervenţie în situaţii de urgenţă. În fine, întreruperea traficului pe un termen mai lung după un cutremur, poate avea efecte economice nefavorabile. De aceea, cerinţa fundamentală a normelor de proiectare antiseismică este aceea de a asigura comunicaţiile de urgenţă în urma unui eveniment seismic de calcul (Eurocode 8-2, 2003).

Ca şi în cazul structurilor pentru clădiri, podurile pot fi proiectate conform principiul de comportare disipativă sau comportare slab-disipativă. Podurile **slab-disipative** sunt cele care au o **ductilitate limitată** (termen folosit de Eurocode 8-2, 2003). Prin proiectare **nu** se asigură cerinţe speciale care să asigure o ductilitate superioară structurii. Încărcările seismice sunt determinate pe baza unor factori de comportare $q \leq 1.5$. În cazul podurilor răspunsul cărora este dominat de modurile superioare de vibraţie (de exemplu podurile suspendate), sau atunci când structura are un comportament fragil (datorită unor forţe axiale sau tăietoare mari), este recomandată asigurarea unui comportament elastic al structurii sub efectul acţiunii seismice de calcul. În acest sens, se utilizarea un factor de comportare q=1.

Podurile **disipative** (sau **ductile** în terminologia Eurocode 8-2, 2003) sunt proiectate astfel ca să aibă un comportament ductil sub efectul acţiunii seismice de calcul, disipând energia seismică prin incursiuni în domeniul inelastic. Din această cauză, forţele seismice sunt reduse faţă de cele corespunzătoare unui răspuns elastic, folosind valori supraunitare ale factorului de comportare q.

Alegerea abordării de proiectare (disipativă sau slab-disipativă) este la latitudinea proiectantului, raţiunile principale fiind cele de natură economică. În general, în zonele de seismicitate medie şi ridicată (cu valoarea de calcul a acceleraţiei de vârf a terenului a_g>0.1g), proiectare pe baza principiului de comportare disipativă este mai economică. Principiul de proiectare disipativă sau slab-disipativă a podurilor este identic cu cel aplicat şi altor tipuri de structuri. Pentru detalii suplimentare vezi capitolele 6.1 şi 7.1.

Cerinţa fundamentală de proiectare la starea limită ultimă (SLU) este aceea de asigurare a integrităţii structurale (podul trebuie să-şi păstreze capacitatea portantă), chiar dacă unele elemente pot suferi avarii considerabile (Eurocode8-2, 2003). La starea limită de serviciu (SLS) structura poate suferi doar avarii minore, astfel ca traficul să nu fie perturbat.

8.2. Calculul structural la acţiunea seismică

În cele mai multe cazuri analiza structurală a structurilor pentru poduri poate fi realizată pe două modele plane: unul pe direcţia longitudinală şi altul pe direcţia transversală. Metoda uzuală de calcul a structurilor pentru poduri la acţiunea seismică este un calcul **elastic** folosind metoda de calcul **modal cu spectre de răspuns** (vezi capitolul 5.3.2). În cazul în care răspunsul structurii este guvernat de un singur mod propriu de vibraţie, se pot folosi metode simplificate de calcul, după principiul forţelor laterale din capitolul 5.3.1 aplicabile pentru structuri multietajate. Eurocode 8-2, 2003 foloseşte denumirea de **metoda modului fundamental** pentru acest tip de analiză. Răspunsul seismic al unui pod este guvernat de un singur mod de vibraţie atunci când masa pilelor poate fi neglijată în comparaţie cu masa tablierului ($\leq$20%) şi atunci când structura podului este regulată în plan orizontal (excentricitatea dintre centrul de masă şi cel de rigiditate este mai mică decât 5% din lungimea tablierului).

Pentru metoda de calcul modal cu spectre de răspuns, acţiunea seismică este definită prin spectre de răspuns (vezi capitolul 5.2): două componente orizontale şi una verticală. Componenta verticală poate fi în general neglijată, în special în zonele de seismicitate redusă. Totuşi **componenta verticală** a mişcării seismice trebuie considerată în următoarele cazuri (Eurocode 8-2, 2003):

- în cazul tablierelor realizate din beton precomprimat
- pentru analiza efectelor asupra reazemelor şi rosturilor
- atunci când obiectivul proiectat se află în proximitatea unei falii active (componenta verticală a mişcării seismice este importantă în apropierea zonei epicentrale, vezi capitolul 3.7.2)

Majoritatea structurilor au dimensiuni în plan relativ mici în comparaţie cu lungimea de undă a mişcării seismice, astfel încât acţiunea seismică poate fi considerată aceiaşi pentru întreaga fundaţie a clădirii. La structurile cu deschideri mari, cum sunt podurile, atunci când dimensiunea în plan este comparabilă cu lungimea de undelor seismice, punctele în care acţionează mişcarea seismică (prinderea în fundaţii a pilelor) pot înregistra mişcări diferite. La limită, pilele unui pod înregistrează mişcări în contrasens, inducând deformaţii şi eforturi suplimentare în structură. Mişcarea diferenţiată a punctelor de rezemare a structurii se numeşte **variabilitate spaţială a acţiunii seismice**. Acest fenomen poate fi important la structurile cu deschideri mari condiţiile geologice şi topografice accentuează acest fenomen. Conform Eurocode8-2 (2003), variabilitatea spaţială a mişcării seismice trebuie considerată la determinarea răspunsului seismic al structurilor pentru poduri în următoarele cazuri:

- atunci când există discontinuităţi geologice (de exemplu un teren slab situat direct peste rocă)
- atunci când terenul are o topografie variată
- dacă lungimea podului depăşeşte 600 metri

8.3. Ductilitatea şi conformarea seismică a structurilor pentru poduri

Podurile pot fi realizate din diverse materiale de construcţie, iar principiile de asigurare a ductilităţii la nivel de material, secţiune şi element sunt aceleaşi cu cele descrise în capitolul 6 (pentru structurile metalice) şi capitolul 7 (pentru structurile din beton armat).

Aspectele specifice podurilor sunt cele de asigurare a ductilităţii la nivel de structură. La structurile pentru poduri, **zonele disipative** sunt amplasate în pile, de obicei la baza acestora. Aceste zone care sunt supuse unor deformaţii inelastice importante trebuie proiectate şi detaliate astfel ca să dezvolte o ductilitate cât mai bună. Cerinţele specifice sunt cele discutate în capitolele 6 şi 7. În cazul structurilor din beton armat sunt esenţiale armarea zonelor disipative care să asigure o confinare adecvată a betonului, prevenirea cedării din forţă tăietoare şi dispunerea înnădirilor în afara zonelor disipative. În Figura 8.2a este prezentat un exemplu de avariere datorită armării insuficiente a zonei disipative de la baza unei pile din b.a., iar în Figura 8.2b o cedare fragilă din forţă tăietoare. În cazul structurilor metalice, cerinţele fundamentale de asigurarea a unui comportament ductil în zonele disipative le reprezintă prevenirea flambajului la nivel de element şi voalarea secţiunii.

Tablierul trebuie proiectat astfel ca să rămână în domeniul elastic. Sunt permise avarii minore la elementele secundare, cum ar fi rosturile de dilataţie, parapete, etc. Astfel, suprastructura (tablierul, reazemele, rosturile de dilataţie) reprezintă elemente **nedisipative**. O cerinţa importantă este ca tablierul să nu se deplaseze de pe reazeme în urma deformaţiilor suferite în timpul acţiunii

seismice. Un exemplu de cedare a unui pod din cauza incapacității aparatelor de reazem de a prelua deformațiile excesive induse de cutremur este cazul podului Showa avariat grav în timpul cutremurului din 1964 din Niigata, Japonia (vezi Figura 8.4a).

Comportamentul elastic al **elementelor nedisipative** (tablier, reazeme) se asigură pe baza principiilor de proiectare bazată pe capacitate (vezi capitolul 6.1.2). Astfel, forțele de calcul asupra elementelor nedisipative trebuie să corespundă echilibrului de forțe la formarea mecanismului plastic, în care eforturile din articulații plastice țin cont de suprarezistența acestora (din cauza consolidării şi a rezistenței reale mai mare decât cea caracteristică).

În cazul structurilor disipative, o ductilitate de ansamblu superioară se obține atunci când articulațiile plastice se formează simultan în cât mai multe pile. Există multe cazuri când configurația terenului poate conduce la pile cu rigidități foarte diferite (vezi Figura 8.3). Atunci când tablierul este continuu, pilele cu rigiditatea mai mare vor atrage forțe seismice mai mari, ceea ce conduce la o solicitare neuniformă a acestora şi la cedarea lor prematură. De aceea, pilele trebuie să aibă pe cât posibil o **distribuție cât mai uniformă a rigidității şi rezistenței**. Atunci când nu este posibilă asigurarea unei rigidități uniforme, o soluție posibilă este dispunerea unor rezeme de alunecare sau din elastomeri între suprastructură şi pilele cu rigiditate mare, care să elimine sau să limiteze transmiterea forțelor de inerție de la suprastructură la pile.

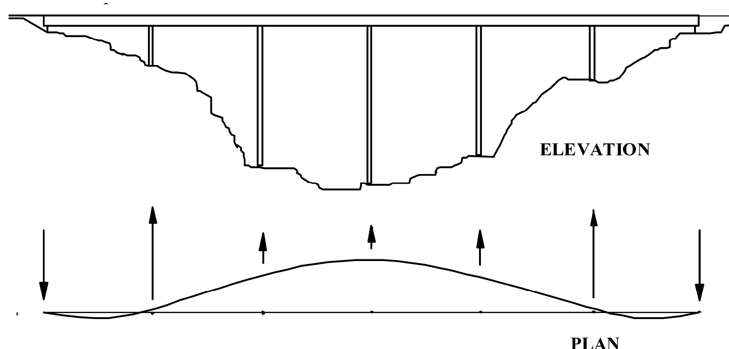


(a)

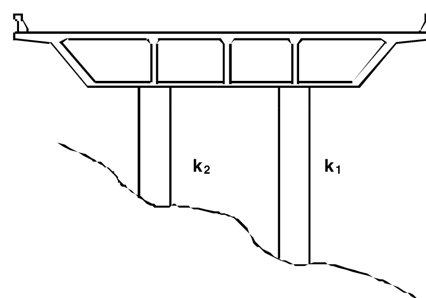


(b)

Figura 8.2. Avarierea unei pile de la viaductul Hanshin în timpul cutremurului din 1995 din Kobe, Japonia (a) şi cedarea din forță tăietoare la pilele unui viaduct la cutremurul San Fernando , SUA, din 1971 (b), Moehle şi Eberhard, 2000.



(a)



(b)

Figura 8.3. Exemple de poduri cu distribuții nefavorabile ale rigidității între pile în plan longitudinal (a) Eurocode8-2, 2003, şi în plan transversal (b) Duan şi Chen, 2003.

La **podurile oblice** axa longitudinala a tablierului nu este perpendiculară pe elementele infrastructurii (pile şi culee). Tablierul acestor poduri au tendința să se rotească în plan vertical, conducând la deplasarea de pe reazeme a tablierului. Din acest motiv podurile oblice şi cele curbe nu sunt recomandate în zone seismice. Eurocode 8-2, 2003 recomandă evitarea podurilor cu un unghi oblic mai mare de 45° în zonele de seismicitate ridicată. În Figura 8.4b este prezentată colapsul unui viaduct oblic ca urmare a deplasării tablierului la rosturile de dilatație.



(a)



(b)

Figura 8.4. Cedarea podului Showa în timpul cutremurului din 1964 din Niigata, Japonia datorită deplasării de pe reazeme (a) - http://cee.uiuc.edu/sstl/education/liquefaction/SHOWA.html şi cedarea viaductului Gavin Canyon la cutremurul din 1994 din Northridge, SUA (b) - http://www.its.dot.gov/JPODOCS/REPTS_TE/13775.html

În general, **structurile continue** au o comportare seismică mai bună decât cele care au un număr mare de reazeme mobile şi rosturi de dilatație. Acestea din urmă sunt însă necesare pentru a limita eforturile din variații de temperatură.

8.4. Tipuri de structuri şi factori de comportare

Ca şi în cazul structurilor pentru clădiri, metoda standard de analiză în cazul structurilor pentru poduri este metoda de calcul modal cu spectre de răspuns (un calcul elastic). În cazul proiectării pe baza principiului de comportare disipativă a structurii, capacitatea structurii de a se deforma în domeniul inelastic (cu degradarea elementelor structurale, dar fără a ajunge la colaps) este reflectată prin factorii de comportare *q*. Valoarea de referință a factorilor de comportare *q* pentru diferite tipuri de structuri este prezentată în Tabelul 8.1.

Valorile factorilor de comportare *q* din Tabelul 8.1 reflectă ductilitatea diferitelor tipuri de elemente disipative (a tipului de structură), a diferitelor materiale folosite şi a principiului de proiectare folosit. Astfel, structurile bazate pe un comportament disipativ sunt caracterizate de factori de comportare mai ridicați. La structurile din b.a., forța tăietoare reprezintă un mod de solicitare fragil. Cu cât lungimea unei pile raportată la înălțimea secțiunii (raportul $\alpha_s = L/h$) este mai mică, cu atât forța tăietoare corespunzătoare formării articulației plastice la baza pilei va fi mai mare. Dea ceea, factorul de comportare *q* are valori reduse în cazul pilelor cu un raport *L/h* redus, atunci când elementul structural este susceptibil la cedare din forță tăietoare.

În cazul structurilor metalice se poate observa că structurile necontravântuite şi cele contravântuite excentric sunt cele mai ductile, iar cele contravântuite centric – cele mai puțin ductile. Această observație reflectă faptul că la structurile metalice, deformațiile inelastice de încovoiere şi de forfecare sunt foarte ductile, în comparație cu cele de întindere (vezi capitolul 6).

La structurile de poduri la care suprastructura este prinsă rigid de culee, rezultă o structură cu rigiditatea foarte mare în plan orizontal. Structurile care sunt foarte rigide oscilează solidar cu

terenul de fundare, rezultând deplasări relative apropiate de zero şi accelerații ale structurii apropiate de accelerația terenului. Aceste structuri nu înregistrează amplificări importante ale mişcării seismice de către structură şi pot fi proiectate pe baza unor factori de comportare q=1 (în cazul structurilor foarte rigide - $T \leq 0.03$ s) sau q=1.5 (în cazul structurilor mai puțin rigide – $T>0.03$ s).

Tabelul 8.1. Valoarea de referință a factorului de comportare q (după Eurocode 8-2, 2003).

Tipul elementului ductil	Comportament: slab-disipativ	Comportament: disipativ
Pile din beton armat: Pile verticale supuse la încovoiere (a) Pile înclinate supuse la încovoiere (b) (a) (b)	 1.5 1.2	 $3.5\lambda(\alpha_s)$ $2.1\lambda(\alpha_s)$
Pile metalice: Pile verticale necontravântuite [supuse la încovoiere] – (a) Pile înclinate necontravântuite [supuse la încovoiere] – (b) Cadre contravântuite centric – (c) Cadre contravântuite excentric – (d) (a) (b) (c) (d)	 1.5 1.2 1.5 -	 3.5 2.0 2.5 3.5
Culee prinse rigid de suprastructură: În general Structuri "fixe" (cu perioada proprie de vibrație în direcția orizontală $T \leq 0.03$ s)	 1.5 1.0	 1.5 1.0
Arce	1.2	2.0
$\alpha_s=L/h$, unde L este distanța de la articulația plastică până la punctul de moment zero, iar h este înălțimea secțiunii pe direcția de acțiune a momentului încovoietor din articulați plastică Pentru $\alpha_s \geq 3$ $\lambda(\alpha_s)=1.0$ Pentru $3>\alpha_s \geq 1$ $\lambda(\alpha_s)=\sqrt{\alpha_s/3}$		

Aceste valori reprezintă limita maximă a factorul de comportare care poate fi folosită în proiectare, atunci când structura îndeplineşte toate condiţiile care să-i sigure un comportament ductil. Printre situaţiile care pot conduce la o ductilitate scăzută şi care necesită reducerea factorilor de comportare se numără următoarele (Eurocode 8-2, 2003):

- Structuri cu un **comportament seismic neregulat**. Solicitarea neuniformă a elementelor disipative conduce la concentrarea a deformaţiilor inelastice în câteva elemente structurale (pile), ducând la o ductilitate redusă la nivelul întregii structuri şi la o capacitate redusă de disipare a energiei seismice.
- În cazul structurilor din b.a., valori ridicate ale **forţei axiale de compresiune** pot reduce ductilitatea articulaţiilor plastice de încovoiere. Valorile factorul de comportare din Tabelul 8.1 sunt valabile pentru forţe axiale din gruparea seismică de încărcări care nu depăşesc 30% din rezistenţa secţiunii la forţă axială. Pentru forţe axiale care depăşesc 30% din rezistenţa secţiunii la forţă axială, este necesară folosirea unui factor de comportare redus. În cazurile în care forţa axială de calcul depăşeşte 60% din rezistenţa secţiunii la forţă axială, nu se poate conta pe un comportament disipativ al structurii, încărcarea seismică fiind determinată pe baza unui factor de comportare q=1.

Proiectarea pe baza conceptului de comportare disipativă implică acceptarea unor degradări în elementele disipative în urma acţiunii seismice de calcul. Eventualele degradări ale elementelor de rezistenţă trebuie să poată fin inspectate şi remediate. De aceea, **zonele disipative trebuie să fie accesibile**. Atunci când acestea nu sunt accesibile pentru inspecţie şi lucrări de remediere (de exemplu baza pilelor aflate în apă de adâncime mare) este necesară utilizarea unor factori de comportare reduşi faţă de valorile de referinţă. Proiectare pe baza unor factori de comportare reduşi va implica o cerinţă de ductilitate redusă, adică degradări mai reduse ale elementelor disipative. Eurocode 8-2 (2003) recomandă multiplicarea valorilor de referinţă a factorului de comportare q cu 0.6 atunci când zonele disipative nu sunt accesibile.